

古尔班通古特沙漠南缘地下水深埋区幼龄梭梭 春夏季土壤水分利用动态

傅思华^{1,2}, 胡顺军¹, 杨涛^{1,3}, 朱海^{1,2}, 周天河⁴

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验站, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 4. 赣州水务集团有限责任公司, 江西 赣州 341000)

摘要: 梭梭是古尔班通古特沙漠的建群种, 为研究梭梭水分利用特征及季节变化, 于2014年5月和7月利用稳定性同位素技术测量幼龄梭梭小枝木质部水、冠下0—400 cm不同土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 采用直接对比法、平均深度模型以及Iso-Source模型对幼龄梭梭春夏季的水分来源进行分析。结果表明: 幼龄梭梭冠下0—70 cm土壤含水量5月显著高于7月, 70 cm及以下土层土壤含水量5月、7月相差不大; 表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较大, 5月表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与7月相比显著偏小; 5月各土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化复杂, 7月各土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化单一, 随深度增加逐渐减小; 幼龄梭梭5月主要利用0—50 cm土层的土壤水, 利用比例达67.5%, 7月主要利用250—400 cm土层的土壤水, 利用比例达94.2%。

关键词: 梭梭; 土壤水分; 稳定性同位素; 古尔班通古特沙漠

中图分类号: Q945.17; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0230-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.038

The Dynamic of Soil Water Utilization in Spring and Summer of Young *Haloxylon ammodendron* at Deep Groundwater of Southern Edge of Gurbantüggüt Desert

FU Sihua^{1,2}, HU Shunjun¹, YANG Tao^{1,3}, ZHU Hai^{1,2}, ZHOU Tianhe⁴

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academic of Sciences, Urumqi 830011; 2. University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049; 3. College of Hydrology and Water Resources HoHai University, Nanjing 210098; 4. Gan Zhou Water Group Co., Ltd, Ganzhou, Jiangxi 341000)

Abstract: Water is not only an important factor limiting the survival and growth of plants, but also a factor influencing the distribution and quantity of vegetation in arid areas. *Haloxylon ammodendron* is a dominant plant species in the Gurbantüggüt Desert. Studing the water use pattern and seasonal changes is vital for understanding plant adaptation to environmental changes in the arid zone. In this study, the oxygen sable isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of xylem water and soil water in different soil layers (0—400 cm) were measured, and the water resource of young *Haloxylon ammodendron* in spring and summer were analyzed with direct comparison method, Iso-Source model and the mean depth of water uptake model. The results show that (1) The soil water of 0—70 cm in May was significantly higher than the surface soil moisture content in July, the difference of soil moisture content in 70—400 cm soil layer is not significant in Spring and Summer. (2) The $\delta^{18}\text{O}$ values of surface soil water changed widely. In May, the $\delta^{18}\text{O}$ value of surface soil water was varied and it's significantly more negative compared with July. In July, the $\delta^{18}\text{O}$ value of soil water gradually decreases with depth increases. (3) The mainly water resource of young *Haloxylon ammodendron* is the soil water in 0—50 cm soil layer in May, the use ratio is up to 67.5%. However, in July, the contribution of surface soil water decreased drastically while that deep soil water increased rapidly, the mainly water resource is the soil water in 250—400 cm soil layer in July, the use ratio is up to 94.2%.

Keywords: *Haloxylon ammodendron*; water sources; stable isotope; Gurbantüggüt desert

收稿日期: 2016-04-25

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB429902); 国家自然科学基金—新疆联合基金面上项目(U1303181)

第一作者: 傅思华(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源学研究。E-mail: 1148898134@qq.com

通信作者: 胡顺军(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水文与水资源学研究。E-mail: xjhshunjun@aliyun.com

水是限制干旱与半干旱地区生态系统过程和发展的主要因子,植物的生长、分布状况与水的可利用性密切相关^[1]。植物水分全部来自于外界,主要能利用的水源有降水、径流(包括融雪水)、土壤水以及地下水等。植物主要利用根系对各水源进行利用,传统的根系挖掘法在研究植物水分来源时具有一定的破坏性,耗时长并存在一定的困难^[2]。稳定性同位素技术广泛运用于生态学领域,可以定量研究不同水源对植物的相对贡献率,为研究植物水分来源提供有效的方法。各水源在蒸发等外界条件下会发生同位素分馏,导致土壤水、径流、地下水等的稳定性氢氧同位素组成产生明显差异^[3]。植物根系吸收的水分沿木质部向上运输时,在到达非绿色枝条之前一般不发生分馏作用。因此,可以通过对比植物木质部水分与不同水源之间稳定性氢氧同位素的组成,确定植物对各水源的吸收、利用情况^[4]。目前,国内外学者基于稳定性同位素技术对于植物的水分来源进行大量研究,包括不同生活型植物水分利用,不同生长阶段植物水分利用,不同气候类型下植物水分利用等^[5-7]。研究干旱区植物水分来源对于认识干旱区气候变化条件下植物的适用性,以及对干旱区植被保护、恢复与重建具有重要的理论和现实意义。

古尔班通古特沙漠位于准噶尔盆地中央,远离海洋,降水稀少,是我国面积最大的固定、半固定沙漠,相较于其他沙漠,古尔班通古特沙漠植被覆盖度较高且冬季有稳定性降雪^[8]。梭梭作为主要建群种,对于防止沙丘移动及当地的生态环境保护有重要的作用。刘斌、司朗明等^[9-10]先后对古尔班通古特沙漠西部梭梭进行调查分析,结果发现,土壤含水量的减少以及地下水埋深的增加是梭梭退化死亡的重要原因。利用稳定性同位素技术,朱雅娟和贾志清^[11]研究了秋季巴丹吉林沙漠东南缘人工梭梭林的水分来源,结果表明,随林龄增加,梭梭对地下水的利用比例逐渐增加,而对浅层土壤水分的利用比例逐渐降低。吕金岭等^[12]对准噶尔盆地南缘荒漠区梭梭维持水源进行了初步研究,结果表明,地下水埋深5~10 m条件下,地下水、融雪水形成的浅层土壤水是该区梭梭的主要水源。戴岳等^[13]研究了古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态,结果表明:地下水埋深4 m左右,4月梭梭主要利用浅层土壤水;5—9月梭梭主要利用地下水。本文在前人研究的基础上,应用稳定性同位素技术分析自然生境中梭梭的水分来源,研究结果不仅对进一步研究固沙植被-土壤系统水分传输与水分平衡具有重要参考价值,而且为梭梭种群的保护提供水源方面的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于古尔班通古特沙漠南缘北沙窝

(44°22.63'N,87°55.21'E),属于温带大陆性荒漠气候,研究区夏季干燥炎热,冬季寒冷,年平均温度7.19℃,极端最高气温41.5℃,极端最低气温-37℃,年降水量100~150 mm,年潜在蒸发量2 000 mm,地下水埋深9.7 m左右。地貌以树枝状沙垄为主,南北走向,东坡陡西坡缓,东坡坡度17°~23°,西坡坡度为12°~18°,高度为5~7 m^[14]。土壤以固定、半固定风沙土为主,主要由粉粒和沙粒组成。植被覆盖较好,以旱生类型为主,其中梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)为主要的建群种,另外生长了尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhinchum*)、粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis*)、沙漠绢蒿(*Seriophidiam santolinum*)等大量的一年生草本及短命、类短命植物^[15-16]。

1.2 样品采集及数据测定

植物样采集:于2014年5月在北沙窝试验区丘间地选取生境及长势相近的小梭梭3株作为样株(表1)。在5月7日和7月30日进行样品的采集,每株小梭梭采集3个样品。植物采样方法:剪下非绿色小枝,去除枝条外皮,装入样品瓶并用Parafilm封口膜密封,立即放入携带的保温桶中(内置冰块)冷藏保存。

表1 小梭梭的形态特征

植物	株高/m	冠幅/(m×m)	基径/cm
小梭梭1	0.70	0.50×0.70	5.0
小梭梭2	0.78	0.60×0.50	5.5
小梭梭3	0.78	0.50×0.40	4.8

土壤样品采集:在梭梭冠下用土钻取0—400 cm深的土壤样品,取样时间同植物取样时间一致。取样方法:0—80 cm,每隔10 cm取样;80—200 cm,每隔20 cm取样;200—400 cm每隔50 cm取样。每个样品分两份,一份样品装入样品瓶中,放入保温桶中用于测量土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值;一份装入铝盒后立即称湿重,用烘干法(105℃,24 h)烘至恒重,测定土壤含水量。

样品测定:在阿克苏水平衡试验站进行样品测定。采用低温真空抽提法提取植物木质部水及土壤水,采用液态水同位素分析仪(Picarro L2130-i)测量抽提水的稳定性氢氧同位素含量。Picarro L2130-i的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 分析误差分别小于 $\pm 0.5\text{‰}$ 。样品同位素值计算方法为:

$$\delta X = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: $R_{\text{样品}}$ 为样品中元素的重轻同位素丰度之比, D 和 ^{18}O 同位素的比率为 $R_{\text{样品}} = (\text{D}/^1\text{H})_{\text{样品}}$, $R_{\text{样品}} = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{样品}}$; $R_{\text{标准}}$ 为国际通用标准物的重轻同位素丰度比,如 $R_{\text{标准}} = (\text{D}/^1\text{H})_{\text{标准}}$, $R_{\text{标准}} = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{标准}}$; δX 为同位素比值相对标准同位素比值的千分差。

气象数据来自于阜康北沙窝自动气象站。

1.3 水源确定方法

Ellsworth 等^[17]研究表明,旱生植物的茎在水分输送过程中重同位素 D 可能会发生分馏,所以在用 Iso-Source 模型计算植物水分来源时仅用¹⁸O 同位素。

1.3.1 直接对比法 通过直接对比植物木质部水与不同潜在水源的稳定性 $\delta^{18}\text{O}$ 值,判断植物主要利用的水源。当植物木质部水与某种潜在水源 $\delta^{18}\text{O}$ 值有交叉时或相近时,则认为植物利用了该水源,并且两者的同位素值越相近说明利用该水源的比例越大^[18]。将幼龄梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行对比分析,分析得出幼龄梭梭的主要水分来源。

1.3.2 Iso-Source 模型(多水源混合模型) 该模型由 Phillips 等^[19]提出,用此模型可估算存在多种水源情况下对各水源利用的可能比例。公式如下:

$$\delta X_p = \sum_{i=1}^n f_i \delta X_i \quad I = \sum_{i=1}^n f_i$$

式中: δX_p 为植物木质部水分稳定氢氧同位素; δX_i 为潜在水源 i 的稳定氢氧同位素值; f_i 为潜在水源 i 在植物所利用的水分总量中的贡献比例。本次试验处理数据中,模型运行的 2 个参数,来源增量均设为 1%,质量平衡公差均设为 0.01%。

1.3.3 平均深度模型 采用 Romero 等^[20]提出的潜在平均深度模型,计算植物吸收土壤水分的平均深度。该模型同样基于同位素质量平衡原理,根据植物木质部水与土壤水稳定性氧同位素值估算植物吸收水分的潜在平均深度。

$$n_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\delta^{18}\text{O}_c(\text{‰}) = \sum_{i=1}^m (n_i \times \delta^{18}\text{O}_i)$$

式中: n_i 为对应深度 Y 的土壤水利用比例; μ 为植物吸收土壤水分的平均深度(cm); $\delta^{18}\text{O}_c$ 和 $\delta^{18}\text{O}_i$ 分别为计算的植物茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 i 层土壤水的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值。模型结合 MATLAB 软件,标准差 σ 设定为 8.33 cm,当计算的 $\delta^{18}\text{O}_c$ 值与实测的植物茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相等时,所对应的土壤深度则为植物利用水分的平均土壤深度。

1.3.4 水源划分 根据小梭梭冠下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化,对小梭梭冠下土壤水源分组进行如下划分:0—10,10—30,30—50,50—120,120—250,250—400 cm。由于地下水埋藏深,采样期间无降雨,所以本研究中,潜在水源没有降雨和地下水。利用直接对比法判断植物的主要水分来源,Iso-Source 模型对各潜在水源及植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 模拟计算,估算出植物对各潜在水源的平均利用比例,平均深度模型估算植物利用土壤水的平均深度。

1.4 数据分析

采用 Excel 软件对数据进行统计处理,采用 SPSS 16.0 软件对数据进行相关分析和显著性检验,采用 origin 8.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量及土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征

从平均土壤含水量可以看出(图 1),在 0—400 cm 土壤剖面上,0—70 cm 土层土壤含水量变化显著,70—400 cm 土层土壤含水量变化不显著。土壤含水量的季节变化是,0—70 cm 土壤含水量 5 月显著高于 7 月($P < 0.05$),70—400 cm 土壤含水量季节性变化不显著。5 月土壤水分受到融雪水补给影响,表层土壤含水量显著高于深层土壤含水量($P < 0.05$),含水量最高可达 6.73%,约为最低值的 1.6 倍,70 cm 至深层土壤含水量变化不显著,变化范围为 4.1%~4.5%。7 月,强烈的蒸发作用使表层土壤含水量明显减少,表层土壤含水量最低为 2.39%,土壤含水量由地表至 70 cm 深土层缓慢增加,70 cm 至深层土壤含水量变化不显著,变化范围为 4.21%~4.42%。

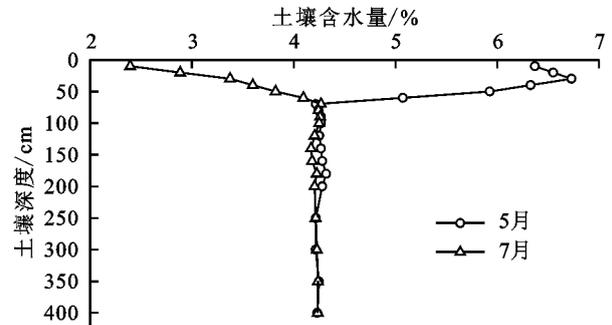


图 1 土壤含水量变化特征

分析不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在垂直方向上的差异性(表 2)可知,地表至 80 cm 深土层,5 月土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著低于 7 月($P < 0.05$),80—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值不存在显著差异($P > 0.05$)。土壤水同位素值变化主要受降雨和蒸发影响,蒸发作用会使地表土壤水的同位素产生分馏,轻同位素分馏出去而重同位素在地表富集^[21]。

5 月,地表土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,为 -7.996‰,由表层土壤水至 30 cm 深土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减小,30—70 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐增大,70 cm 深土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值达到峰值 -6.056‰,70 cm 深土层土壤水至深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值缓慢减小。7 月,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较简单,强烈的蒸发作用表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高,最高值为 2.76‰,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 0—400 cm 土壤剖面随着深度的增加逐渐减小。

2.2 幼龄梭梭吸水层位及平均吸水深度

5 月和 7 月幼龄梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为

-10.120‰和-9.230‰,季节差别较大,5月梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值比 7 月梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值小。由图 2 可见,5 月,幼龄梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 10—20 cm 土层及 40—50 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交,且与 300—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近,因此,幼龄梭梭可能的水分来源为 0—50 cm 和 300—400 cm 土层土壤水。7 月,幼龄梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 300—350 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交,并且与 250—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值极相近,因此,幼龄梭梭可能利用的水分来源为深约 250—400 cm 土层土壤水。

平均深度模型计算 5 月幼龄梭梭平均吸水深度时出现 2 个值:16.3 cm,34.3 cm,这与张俊、刘树宝等^[22-23]的研究结果类似,已有研究表明,在干旱区才会出现该现象。7 月幼龄梭梭平均吸水深度为 293.9 cm。

2.3 梭梭对各潜在水源的利用比例

土壤含水量的变化极大地影响了植物对各土层水分利用情况,5 月,土壤含水量 0—70 cm 土层的含水量显著高于深层土壤;7 月,70 cm 及至深层土壤含水量显著高于表层土壤。随着土壤含水量的变化,幼龄梭梭对土壤水分的利用深度逐渐下降,春夏季存在显著的差异。

表 2 不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节差异

土壤深度/cm	5 月 $\delta^{18}\text{O}$ 值/‰	7 月 $\delta^{18}\text{O}$ 值/‰
10	-7.997±0.466	2.765±0.092
20	-12.009±0.369	1.891±0.313
30	-12.370±0.138	1.665±0.261
40	-10.235±0.289	-0.176±0.243
50	-8.084±0.301	-2.050±0.353
60	-6.853±0.447	-3.878±0.152
70	-6.056±0.245	-5.226±0.194
80	-6.205±0.146	-6.138±0.220
100	-6.714±0.103	-6.882±0.146
120	-6.726±0.277	-7.431±0.480
140	-7.046±0.145	-7.333±0.318
160	-7.752±0.278	-7.821±0.179
180	-7.745±0.130	-8.188±0.387
200	-7.766±0.458	-8.341±0.289
250	-8.210±0.228	-8.477±0.498
300	-9.330±0.365	-8.957±0.376
350	-9.704±0.272	-9.641±0.258
400	-9.705±0.284	-9.561±0.240

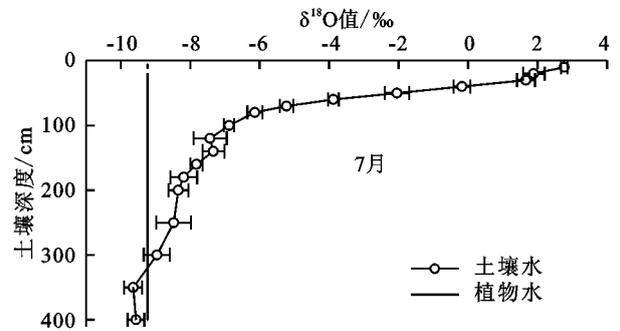
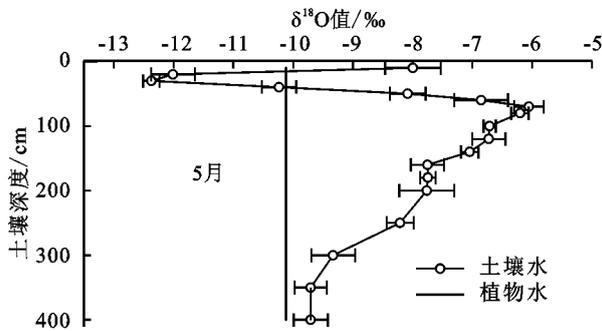


图 2 幼龄梭梭木质部水及土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

利用 Iso-Source 模型进行估算,幼龄梭梭对各潜在水源利用情况如下,5 月幼龄梭梭对 0—10,10—30,30—50,50—120,120—250,250—400 cm 土层土壤水的平均利用比例分别为 9.8%,43.9%,13.8%,7.1%,9.2%,1.61%,7 月幼龄梭梭对 0—10,10—30,30—50,50—120,120—250,250—400 cm 土层土壤水的平均利用比例分别为 0.2%,0.2%,0.4%,1.2%,4%,94.2%。因此,5 月幼龄梭梭主要利用 0—50 cm 土层的土壤水,利用率达 67.5%;7 月,幼龄梭梭主要利用 250—400 cm 土层的土壤水,利用率达 94.2%。

3 讨论

梭梭作为我国西北干旱区主要的固沙植物,关于其水分利用情况已展开了一定的研究。相关研究表明,不同区域的梭梭主要水分来源相一致,主要利用水源为浅层土壤水以及稳定的深层土壤水和地下水,但是对于不同水源的利用比例存在一定差异。吕金

岭等^[12]研究表明,浅层土壤水和地下水是梭梭最重要的水源,春、夏季地下水都是梭梭主要水分来源,利用率达 60%~80%,平均达 30%。戴岳等^[13]研究表明,春季主要利用由冬、春季降水补给的浅层土壤水,利用率达 62%~95%,夏季则主要利用地下水,利用率达 68%~100%。本研究主要分析了春夏季梭梭水分利用动态,发现梭梭春季主要利用由融雪水及降水补给的浅层土壤水,平均利用率达高 67.5%,夏季主要利用含水量更丰富的深层土壤水,平均利用率达高 94.25%,研究结果与戴岳等研究结果类似。

植物主要通过根系吸收水分,根系分布特征及其活性对植物利用水分影响重大^[24]。不同龄阶梭梭根系生长发育情况不同,对于不同深度土壤水的利用情况存在差异。朱雅娟等对不同龄阶的人工梭梭研究结果表明,梭梭对土壤水利用情况存在较大的差异,随着龄阶增加更倾向于利用相对稳定的地下水,减少

对浅层土壤水的利用。本研究的研究对象为地下水深埋区(9.7 m左右)幼龄梭梭,参照盛晋华等对梭梭根系研究结果,梭梭主根深度是树高 3.3~4.7倍^[25],因此,本研究中幼龄梭梭潜在水源仅到埋深4 m的土壤水并且不考虑地下水。研究区域的中年、成熟梭梭根系发育比幼龄梭梭更成熟,其水分利用情况较幼龄梭梭是否存在差异需进一步研究分析。

4 结论

(1)0—50 cm 深土壤含水量显著5月高于7月,50—400 cm 深土壤含水量季节变化不显著。

(2)5月幼龄梭梭木质部水同位素值比7月木质部水同位素值小;在强烈的蒸发作用下,7月表层土壤水同位素值与5月存在显著差异,80—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}O$ 值季节差异不显著。

(3)直接对比法、Iso-Source 模型以及平均深度模型3种方法研究结果较为一致,5月幼龄梭梭主要利用0—50 cm 的土壤水,平均吸水深度为16.3 cm和34.3 cm。7月幼龄梭梭主要利用250—400 cm 土层的土壤水,平均吸水深度为293.3 cm。

参考文献:

- [1] Dube O P, Pickup G. Effects of rainfall variability and communal and semi-commercial grazing on land cover in southern African rangelands [J]. *Climate Research*, 2001, 17(2): 195-208.
- [2] 张建锋, 周金星. 林木根系衰老研究方法与机制[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 405-410.
- [3] Máguas C, Griffiths H. Applications of stable isotopes in plant ecology *Progress in botany*[J]. Springer, 2003, 64(5): 472-505.
- [4] 段德玉, 欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分来源中的应用[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 650-660.
- [5] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 等. 柴达木盆地诺木洪地区5种优势荒漠植物水分来源[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6277-6286.
- [6] 朱建佳, 陈辉, 邢星, 等. 柴达木盆地荒漠植物水分来源定量研究: 以格尔木样区为例[J]. *地理研究*, 2015, 34(2): 285-292.
- [7] Nie Y P, Chen H S, Wang K L. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolomite outcrops and nearby thin soils in subtropical China [J]. *Plant Soil*, 2011, 341(1/2): 399-412.
- [8] 钱亦兵, 吴兆宁. 古尔班通古特沙漠环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-196.
- [9] 刘斌, 刘彤, 李磊, 等. 古尔班通古特沙漠西部梭梭大面积退化原因[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 637-642.
- [10] 司朗明, 刘彤, 刘斌, 等. 古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6460-6468.
- [11] 朱雅娟, 贾志清. 秋季巴丹吉林沙漠东南缘人工梭梭林水分来源[J]. *林业科学*, 2012, 48(8): 1-5.
- [12] 吕金岭, 张希明, 吕朝燕, 等. 准噶尔盆地南缘荒漠区梭梭维持水源初步研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 110-117.
- [13] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(11): 1214-1225.
- [14] 朱海, 胡顺军, 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 113-122.
- [15] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 等. 古尔班通古特沙漠植被与环境的关系[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2802-2811.
- [16] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点[J]. *生态学报*, 2002, 22(11): 1923-1932.
- [17] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes [J]. *Plant Soil*, 2007, 291(1): 93-107.
- [18] 余新晓. 森林植被—土壤—大气连续体水分传输过程与机制[M]. 第1版. 北京: 科学出版社, 2016: 87-88.
- [19] Phillips D L, Newsome S D, Gregg J W. Combining sources in stable isotope mixing models: Alternative methods[J]. *Oecologia*, 2005, 144(4): 520-527.
- [20] Romero-Saltos H, Sternberg L D S L, Moreira M Z, et al. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake[J]. *American Journal of Botany*, 2005, 92(3): 443-455.
- [21] 杜雪莲, 王世杰. 稳定性氢氧同位素在植物用水策略中的研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(22): 5-10.
- [22] 张俊, 孙自永, 余绍文. 黑河下游额济纳盆地地下水系统划分[J]. *地下水*, 2008, 30(1): 12-14.
- [23] 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 1-10.
- [24] Nie Y, Chen H, Wang G K, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 264-274.
- [25] 盛晋华, 乔永祥, 刘宏义, 等. 梭梭根系的研究[J]. *草地学报*, 2012, 12(2): 91-94.